



## EXPLOTACIÓN Y PROCESOS MECANIZADOS *OPERATION AND MECHANIZED PROCESSES*

ARTÍCULO ORIGINAL

# Modelación matemática del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar para su racionalización

## *Mathematical modeling of the harvest-transporting of sugar cane for its rationalization*

Ing. Yanara Rodríguez Lopez, M.Sc. Yanoy Morejón Mesa, Ing. Dagoberto M. Sosa Guerra, Ing. Orlando Martínez Bao

**RESUMEN.** La investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base (UEB) Héctor Molina Riaño, con el objetivo de determinar la conformación racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar a través de la modelación matemática. Para cumplir con el objetivo propuesto se plantearon los fundamentos teórico-metodológicos que consideraron la evaluación tecnológica y de explotación de los medios mecanizados y la modelación mediante la Teoría de Cola y la Programación Lineal; con estos fundamentos se obtuvo que para rendimientos agrícolas comprendidos entre 70...90 t/ha es posible realizar la estimación del comportamiento del parámetro de la productividad y tiempo de llenado del medio de transporte KAMAZ con remolque. Además se determinó con el empleo de la Teoría de Cola, que la cantidad racional de conjuntos de transporte para una distancia de 20 km, de los cuales 13 km eran viales de terraplén, en un rendimiento agrícola de 75 t/ha; para una cosechadora, es de seis medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 99,32 peso/h lo cual posibilita obtener una reducción en las pérdidas por paradas de 62,69 peso/h respecto a la conformación actual de la brigada. Esta conformación fue validada con el empleo de la Programación Lineal, evidenciándose que con el empleo de seis medios de transporte es posible obtener una ganancia máxima de 373,77 peso.

**Palabras clave:** teoría de cola, programación lineal, productividad, tiempo de llenado del medio de transporte.

**ABSTRACT.** The investigation was carried out in the Managerial Agricultural Unit (UEB) Héctor Molina Riaño, with the objective of determining the rational conformation of the means that intervene in the process crop-transport of the sugar cane through the mathematical modeling. To fulfill the proposed objective were posed the theoretical-methodological basis for the technological and of exploitation evaluation of the agricultural machines and the modeling using the Queuing Theory and Linear Programming, being obtained that for agricultural yields among 70 and 90 t/ha it is possible to carry out the estimate of the behavior of the parameter of the productivity and time of filling the truck KAMAZ with a tow. It was also determined with the employment of the Queuing Theory that the rational quantity of sets of means of transport for a distance of 20 km, of which 13 km were embankment roads, in an agricultural yield of 75 t/ha, for a combine, it is of six means of transport with a minimum cost for stop of 99.32 peso/h being obtained a reduction in the lost for stop of 62.69 peso/h regarding the current conformation of the brigade. This conformation was validated with the employment of the Linear Programming, being evidenced that it is possible to obtain a maximum profit of 373.77 peso with the employment of six means of transport.

**Keywords:** Queuing theory, linear programming, productivity, time to filling the means of transport.

## INTRODUCCIÓN

Entre los aspectos que determinan el precio del azúcar se pueden citar los que se relacionan con la producción cañera y con la producción del azúcar en sí, en el caso de los aspectos que influyen en la producción de azúcar como producto final a obtener se pueden mencionar: la preparación de la caña a moler, el rendimiento potencial cañero, el porcentaje de Pol en caña, el ajuste de los molinos, entre otros aspectos que se evidencian en el proceso industrial. En el caso de los aspectos que influyen en

la producción cañera, se pueden citar: la calidad de la semilla, la edad de la cepa, la calidad de la preparación de suelo, el riego, las atenciones culturales, entre otros.

Considerando lo planteado anteriormente sobre la influencia de algunos aspectos agrícolas e industriales en la economía, es necesario considerar la influencia que tiene el proceso de cosecha-transporte en la calidad de la materia prima (caña) antes de ser procesada industrialmente; evidenciándose que aunque el proceso

cosecha-transporte no constituye un elemento que influye en el proceso de producción tanto de la caña, como de azúcar en sí, si determina la economía del proceso productivo, pues este proceso se desarrolla con el empleo de un conjunto de medios técnicos entre los que se pueden citar las cosechadoras y los medios de transporte (tractores y/o camiones con carretas o remolques), los cuales sino son racionalmente organizados y no se realizan las acciones de mantenimiento planificadas durante la explotación de los mismos, pueden influir negativamente en los costos totales de producción (Fernández y Álvarez, 1988; Fernández y Delgado, 1989).

El proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar puede detenerse por la no fundamentación de la composición racional de la brigada cosecha-transporte, esto trae como consecuencia la baja estabilidad de flujo del proceso tecnológico y su costo, por lo que se requiere su determinación fundamentada bajo criterios científicos.

Un elemento que influye directamente en la estabilidad y costo del proceso es la composición del complejo cosecha-transporte, la cual se debe determinar considerando criterios técnico-económicos que posibiliten determinar la organización racional del proceso, teniéndose en cuenta el mínimo de los costos por unidad de tiempo y/o unidad de producto cosechado y transportado, donde influyen la productividad de la cosechadora, la capacidad de los medios de transporte, la distancia de transportación, el tipo y condiciones de los viales, los tiempos de espera para la carga del producto en el campo y la descarga en los centros de recepción, sobre lo cual han investigado diversos autores (Server *et al.*, 2002; Shkiliova, *et al.*, 2007; Izmailov, 2007; Amu, 2010; Iglesias *et al.*, 2012; Matos e Iglesias, 2012a; Matos, 2012b; Matos, 2014; Matos y Martínez, 2014).

Por tal razón surge la necesidad de investigar la composición racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Héctor Molina Riaño”, con el propósito de lograr una mayor estabilidad y obtener ventajas económicas en el mismo.

## MÉTODOS

Metodología para la caracterización y evaluación tecnológica y de explotación de los medios que conforman el complejo cosecha- transporte

**Evaluación tecnológica y de explotación de las cosechadoras.** Para la evaluación de las cosechadoras cañeras se considera lo planteado por Suárez *et al.* (2006) y lo reflejado en la NC: 34-37:2003.

**Caracterización de las condiciones generales para la explotación de los medios de transporte.** Para realizar la caracterización de las condiciones generales de explotación de los medios de transporte se establece por principio una clasificación de los viales para el transporte, tomando como base los recorridos desde el campo en cosecha hasta el centro de recepción de la caña. Dicha clasificación de los viales consiste en dos tipos principalmente: viales de terraplén transitables y viales de asfalto o pavimento. En base a las características de transitabilidad se obtiene la velocidad de los medios de transporte con un mínimo de 30 repeticiones, tomándose muestras a una distancia mínima de 5 km, en cada una de las condiciones

de acuerdo a lo planteado en la norma RTM 44-62 (1966), así como la obtención de la prueba de Kolmogorov-Smirnov o coeficiente de concordancia, para indicar si la tendencia de la distribución poblacional de las variables es normal.

Otro aspecto necesario es la determinación del tiempo de ciclo de los medios de transporte el cual está compuesto por el tiempo de espera del medio de transporte en el campo en cosecha para ser llenado por la cosechadora, por el tiempo de recorrido con carga hasta el central a través de los tipos de viales antes mencionados, los tiempos de estancia en el central y finalmente el tiempo de regreso del medio de transporte vacío hacia el campo en cosecha cerrando completamente su ciclo.

## Determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte con el empleo de la Teoría de Cola

El trabajo efectivo de todo el complejo de cosecha-transporte depende en un grado importante de la organización del servicio de transporte, en la práctica productiva la determinación racional de estos medios presenta algunas dificultades.

En condiciones de producción, el momento de llenado del autobasculante y de llegada al campo del medio de transporte no se corresponde en un alto grado. Por otro lado la duración del tiempo de ciclo del conjunto de transporte, depende de la localización de la cosechadora en el campo y la guardarraya, de la velocidad de transportación, del tiempo de pesaje y descarga en el central, por otra parte en el tiempo de llenado del autobasculante influye: el relieve, el rendimiento agrícola del cultivo, la longitud del campo, etcétera. Todo esto trae consigo la inevitable pérdida de tiempo improductivo de la cosechadora y los medios de transporte, de ahí la importancia de considerar los aspectos anteriormente señalados (Yesin, 2013; Shepelyov *et al.*, 2014).

Económicamente es conveniente que la relación entre la cantidad de cosechadoras y los medios de transporte durante el proceso cosecha, sea la mínima necesaria. Este criterio se logra con la función objetivo:

$$S = (C_{PC} \cdot \lambda \cdot t_{esp} + C_{PT} \cdot n) P_{cola} \rightarrow \min, \text{ peso/h} \quad (1)$$

donde:

$C_{pc}$ ,  $C_{pt}$  - costo horario por paradas de la cosechadora y de los medios de transporte, peso/h;

$\lambda$  - número medio de servidores (medios de transporte) que llegan o entran al sistema de servicio masivo o sistema de espera en una unidad de tiempo;

$t_{esp}$  -Tiempo medio de espera de cada solicitud de la cosechadora, h;

$n$  - cantidad de medios de transporte para el servicio de un grupo de cosechadoras;

$P_{cola}$  -probabilidad de que una unidad arribe al sistema y tenga que esperar o sea la probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte.

Considerando lo planteado en la expresión (1) es posible determinar el costo horario por paradas de la cosechadora de la siguiente manera:

$$C_{PC} = C_{exp} = C_{dc} + C_c + C_l + C_{mr} + C_{soc}, \text{ peso/h} \quad (2)$$

donde:

- $C_{exp}$  -Costos de explotación, peso/h;
- $C_{dc}$  -Costo de depreciación de la cosechadora, peso/h;
- $C_c$  -Costo del combustible consumido, peso/h;
- $C_l$  -Costo del lubricante consumido, peso/h;
- $C_{mr}$  -Costo de las operaciones de mantenimiento y reparación, peso/h;  $C_{soc}$  -Costo en salario del operador de la cosechadora, peso/h.

De igual forma se puede determinar el costo del tiempo de parada de los medios de transporte, empleándose la expresión siguiente:

$$C_{PT} = C_{dt} + C_{mr} + C_{sot}, \text{ peso/h} \quad (3)$$

donde:

- $C_{dt}$  - Costo de depreciación del medio de transporte, peso/h;
- $C_{mr}$  -Costo de las operaciones de mantenimiento y reparación, peso/h;
- $C_{sot}$  -Costo en salario del operador del medio de transporte, peso/h.

Estos costos por concepto de parada, pueden variar en función de la cantidad de medios de transporte que se le asignen a un grupo determinado de cosechadoras; por tanto para determinar la cantidad de medios de transporte necesarios sin tener en cuenta el carácter probabilístico de interrelación del sistema cosecha-transporte, se emplea la expresión siguiente:

$$n = \frac{\sum W_{07}}{\sum W_{tt}} = \frac{\frac{Q}{T_{07}}}{\frac{q_n}{T_c}} \quad (4)$$

Por el sistema tradicional de cálculo se puede obtener la cantidad de medios de transporte, pero es imposible determinar la cantidad media de cosechadoras en cola para ser serviciadas, y la duración media del tiempo de espera de los medios de transporte. Por esta causa evaluar las pérdidas por las paradas de las cosechadoras no es posible por una u otra comparación cuantitativa del eslabón de transporte; por lo que el complejo cosecha-transporte se subordina a un proceso de servicio masivo.

Durante los trabajos en grupos de cosechadoras, surgen solicitudes de serviciaje cuando el autobasculante está lleno. Después de la descarga del autobasculante, la cosechadora comienza la cosecha nuevamente, si no existe otro autobasculante que se alterne con el que entrega el producto cosechado. De esta manera el sistema cosechadora-autobasculante-medio de transporte se comporta como un sistema cerrado de servicio masivo, en el cual como promedio surgen ( $\lambda$ ) solicitudes de servicio en una unidad de tiempo dada. A su vez cada medio de transporte (canal de servicio) tiene la capacidad de satisfacer ( $\mu$ ) las solicitudes en una unidad de tiempo.

La probabilidad de que haya C unidades (cosechadoras) en el sistema (en el servicio estén ocupadas las cosechadoras) cuando se cumple la condición ( $0 \leq C \leq n$ ) se determina mediante la expresión:

$$P_C = \frac{\phi^C \cdot P_0}{C!} \quad (5)$$

A partir de la probabilidad anterior es posible determinar la probabilidad de que una unidad del complejo cosecha-transporte arribe al sistema y tenga que esperar o sea la probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte, se determina de la siguiente manera:

De forma resumida se puede determinar por la siguiente expresión:

$$P_{cola} = 1 - \sum_{C=1}^n P_C \quad (6)$$

Determinación de la composición racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte con el empleo de la Programación Lineal

La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de un sistema de inecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inecuaciones lineales.

En esta investigación se definen las variables teniendo en cuenta la cantidad y conformación de los eslabones de cosecha y transporte a utilizar durante el desarrollo del proceso tecnológico. Estas variables son números reales mayores o iguales a cero ( $X_{ij} \geq 0$ ), en este caso se requiere que el valor resultante de las variables sea un número entero, por tanto el procedimiento de resolución se denomina Programación entera.

1. Primeras restricciones para asegurar el cumplimiento del volumen total de trabajo, para todos los períodos.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijkt} = b_k \quad k = 1 \dots K \quad (7)$$

donde:

- i - índice del tipo de transporte;
  - j - índice del tipo de remolque;
  - k - índice de la labor de transporte;
  - t - índice de la distancia de transportación;
  - $b_k$  - volumen dado de trabajo; I - Cantidad de medios de transporte;
  - J - Cantidad de remolques o carretas; T - Distancia de transportación.
2. El segundo grupo de restricciones, para determinar la cantidad racional de medios de transporte a utilizar en la brigada de cosecha:

$$\sum_{i=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \frac{X_{i...n} \cdot Q}{W_i T_c} \leq X_i \quad i = 1 \dots I \quad (8)$$

donde:

- $W_i$  - productividad del medio de transporte, t/h;

$T_c$  - tiempo de ciclo de transportación;  $h$ ;  
 $Q$ - Volumen de producción,  $t$ ;  
 $K$  - Cantidad de ciclos de transportación a realizar.

Esta restricción incluye a todos conjuntos de transporte para determinar la cantidad necesaria de los mismos.

3. Es necesario incluir una restricción para que la cantidad de cosechadoras sea mayor o igual a uno.
4. Condición de no negatividad.

$$X_{ijkt}; X_i; X_j \geq 0 \quad (9)$$

La función objetivo en este modelo se describe de la siguiente forma:

$$MINZ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{exp} X_{ijkt} \quad (10)$$

donde:

$C_{exp}$  – Costos de explotación por tonelada cosechada y transportada con el medio de transporte (i) con remolque (j) en la transportación, donde se incluyen los costos por salario, combustible y lubricantes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de la evaluación tecnológica y de explotación de las cosechadoras

Las cosechadoras CASE IH AUTOSOFT 8800 por indicaciones del fabricante para que trabajen con altos índices económicos y productivos tienen que cosechar en campos de altos rendimientos agrícolas, por lo que fueron evaluadas durante 55,85 h en campos cuyos rendimientos agrícolas estimados fueron de 70; 75; 85 y 90 t/ha.

El período de tiempo evaluado para la cosechadora en el área de estudio, se consideró en base a la metodología de la norma NC: 34-37, 2003. Los datos de los tiempos tecnológicos fueron organizados según los rendimientos agrícolas esperados en cada campo estudiado.

Partiendo del tiempo total cronometrado, se obtuvo un tiempo limpio (T1) de 17 h equivalente al 30% del tiempo total; un tiempo auxiliar (T2) de 3,03 h equivalente al 6%; un tiempo de mantenimiento técnico (T3) de 12,36 h equivalente al 22%; un tiempo para la eliminación de fallos (T4) de 3,55 h equivalente al 6%; un tiempo de descanso del personal de servicio de la máquina (T5) de 0,59 h equivalente al 1%; un tiempo de traslado en vacío (T6) de 0,83 h equivale al 2%; un tiempo de mantenimiento técnico diario de la máquina (T7) de 0,2 h equivalente al 0,3% y un tiempo de paradas por causas ajena de la máquina (T8) de 18,49 h equivalente al 33% incidiendo negativamente la existencia de áreas sin condiciones para la mecanización, la humedad en los campos cañeros a cosechar, falta de medios de transporte y tractor movedor, escasez de materiales y medios para realizar el servicio técnico. Presentando insuficiencias organizativas de la jornada laboral, las cuales se encuentran fundamentalmente en la deficiente gestión para la solución de las fallas técnicas y la espera por medio de transporte.

### Resultados de la evaluación tecnológica y de explotación de los medios de transporte

Para llevar a cabo la transportación de la caña de azúcar, se utilizan camiones KAMAZ a los que se les engancha un remolque, el conjunto tiene una capacidad de 20 t. El ciclo de transportación en esta UEB, se describe como un proceso el cual se lleva a cabo en tres etapas:

- Etapa I. Estancia del transporte en el campo, en espera para ser cargado;
- Etapa II. Traslado de los medios de transporte con carga hacia el ingenio y retorno vacíos al campo en cosecha;
- Etapa III. Estancia del transporte en el ingenio para la descarga de la caña.

Para la evaluación del tiempo de ciclo fueron analizados 9 elementos, desde el campo en cosecha hasta el ingenio y de retorno. Para este medio de transporte se tomó la capacidad nominal de 20 t; la distancia media total de tiro de 20 km, de ellos 13 km por viales de terraplén y el resto de viales asfaltados y como base para el cálculo del tiempo de ciclo el valor de cada uno de los elementos se determinó a través del fotocronometraje.

**Tiempo de ciclo ( $T_c$ ).** Para el cálculo de la productividad de los medios de transporte es necesario determinar el tiempo de ciclo ( $T_c$ ), el cual se determina a través del fotocronometraje de cada uno de los tiempos tecnológicos que intervienen en él y se consideró un rendimiento promedio de 75 t/ha. Para el tiempo de llenado del transporte ( $t_{lMT}$ ), se determina en primer lugar el tiempo de llenado del autobasculante ( $t_{llab}$ ) (ANEXO B, Figuras 1 y 3), cuyo resultado fue de 0,30 h. El tiempo de descarga del autobasculante ( $t_{dab}$ ) al medio de transporte fue de 0,028 h. El tiempo de recorrido promedio del autobasculante ( $t_{rab}$ ) con carga hacia el medio de transporte y vacío hacia la cosechadora fue igual a 0,12 h y 0,11 h respectivamente. La velocidad de recorrido del autobasculante con carga ( $V_{rcc}$ ) y vacío ( $V_{rcv}$ ) alcanzó valores de 8,57 y 8,78 km/h respectivamente y una velocidad media de 8,67 km/h. La cantidad de autobasculantes ( $N_c$ ) que caben en el medio de transporte alcanzó un valor de dos. Por tanto, el tiempo de llenado del medio de transporte ( $t_{lMT}$ ) en el campo en cosecha fue de 1,12 h.

Para determinar el tiempo de recorridos se debe considerar en primer lugar, la ubicación del ingenio, el cual se encuentra a una distancia media de 20 km. Por tanto, los cálculos se realizaron a partir de esta distancia, el resultado para el tiempo de recorridos con carga en terraplén ( $t_{rcc}$ ) fue de 0,78 h; en asfalto ( $t_{rca}$ ) de 0,21 h y en vacío en ambas condiciones ( $t_{rvt}$ ,  $t_{rva}$ ), 0,65 y 0,14 h respectivamente. Por lo que el tiempo medio de recorrido ( $t_r$ ), desde el terreno cosechado hasta el ingenio y viceversa, arrojó el valor de 1,78 h.

Para el cálculo del tiempo de estancia promedio del medio de transporte en el ingenio ( $t_e$ ) se obtuvo 0,67 h. Por tanto, el tiempo de ciclo ( $T_c$ ) es de 3,57 h a partir de la sumatoria de todos los componentes de tiempo que lo conforman para el rendimiento y la distancia de transportación anteriormente planteados

**Productividad teórica ( $W_t$ ) y real ( $W_r$ ) para los medios de transporte.** La determinación de la productividad teórica del medio de transporte ( $W_t$ ) camión KAMAZ con remolque, arrojó valores de 5,60 t/h y 112,04 t-km/h; a su vez la produc-

tividad real ( $W_r$ ) alcanzó valores de 5,32 t/h y 106,44 t-km/h, las que evidenciaron su aplicabilidad.

La productividad real del medio de transporte ( $W_r$ ), está en función de diversos parámetros técnicos y tecnológicos, además de la capacidad de carga real y el tiempo de ciclo, también del rendimiento del cultivo ( $U$ ) y de la productividad de la cosechadora ( $W_c$ ). La relación entre la productividad real del medio de transporte y el rendimiento agrícola se puede observar en la Figura 1, la línea de tendencia indica la alta correlación existente entre el rendimiento agrícola y la productividad del transporte hasta de un 99,84 %, regido por la ecuación  $W_r = 0,0234U + 3,562$  t/h. Por consiguiente se concluye que, a mayor rendimiento del cultivo y caña cortada por la cosechadora, mayor productividad de los medios de transporte.

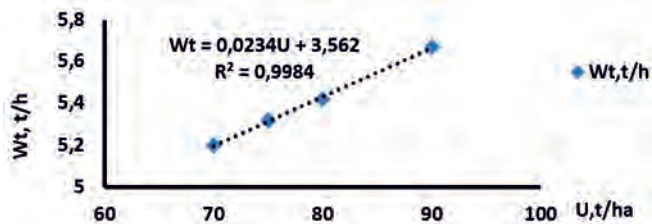


FIGURA 1. Comportamiento de la productividad real de los medios de transporte KAMAZ con remolque respecto al rendimiento agrícola.

### Determinación de la conformación racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar con el empleo de la modelación matemática

Para la determinación de la **conformación racional** de medios de transporte se tomó como ejemplo una brigada conformada por una cosechadora CASE IH- 8800 y un eslabón de transporte conformado por camiones KAMAZ, cada uno con un remolque. El campo de caña cosechado tuvo un rendimiento agrícola promedio de 75 t/ha, y la distancia de transportación es de 13 km por terraplén y 7 km por asfalto desde el campo en cosecha hasta el ingenio.

Es necesario determinar la cantidad racional de medios de transporte en el proceso de cosecha-transporte, utilizando como criterio económico el mínimo costo de la suma por paradas de la cosechadora y medios de transporte para lo cual se emplea la Teoría de Cola y la Programación Lineal.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

La productividad de la cosechadora en tiempo de explotación para un rendimiento agrícola de 75 t/ha fue de 14,23 t/h

El tiempo de llenado del medio de transporte, se determinó partiendo del tiempo de llenado del autobasculante ( $t_{lab}$ ) el cual fue cronometrado y considerando que la cantidad de estos para llenar el medio de transporte es dos, se obtuvo un tiempo de llenado del medio de transporte de 1,12 h.

El tiempo de ciclo de transportación fue de 3,57 h, esto se debe fundamentalmente a las condiciones que presentan los via-

les, lo que dificulta la traficabilidad de los medios de transporte.

La cantidad necesaria de medios de transporte arrojó como resultado que el número de medios de transporte requerido es 2,67 tomándose tres medios de transporte según el método de cálculo utilizado para las condiciones de transportación por terraplén y asfalto desde el campo en cosecha hasta el ingenio, teniendo en cuenta los distintos elementos que conforman el tiempo de ciclo de transportación.

El tiempo medio de llenado del autobasculante para este rendimiento agrícola es igual a 0,30 h. Entonces se tiene que en una hora el canal ( $\lambda$ ) puede satisfacer 3,33 conjuntos de transporte. La capacidad del canal de servicio en una hora ( $\mu$ ) es de 0,84. Se determina la densidad de solicitudes del sistema ( $\rho$ ) obteniéndose como resultado 3,96; siendo  $3,96 > 3$ , por lo que el régimen de funcionamiento del sistema de servicio no es estable y el sistema no puede satisfacer las solicitudes realizadas, por tanto al no cumplirse la condición de estabilidad en el flujo del proceso de cosecha, se debe considerar una cantidad mínima de cuatro medio de transporte, de forma tal que se cumpla la condición de  $3,96 < 4$ .

La probabilidad que en el sistema no existan solicitudes de servicio, o sea todos los medios de transporte estén en espera ( $P_0$ ) es 0,006.

La probabilidad de que estén ocupados los conjuntos de transporte ( $P_c$ ) alcanzó un valor de 0,024.

La probabilidad de que exista una cola en el complejo cosecha-transporte ( $P_{cola}$ ) tuvo un valor de 0,97.

El largo medio de la cola o cantidad de solicitudes en espera de ser satisfechas ( $m_s$ ) es 4,47.

El tiempo medio de espera del complejo cosecha-transporte es ( $t_{esp}$ ) 1,34 h.

El costo por paradas de la cosechadora y medios de transporte (S), se determinó empleando la expresión (1), estos cálculos se realizaron en el mismo orden para dos, tres, cuatro, cinco y seis conjuntos de transporte, respectivamente los cuales se muestran en la Tabla. 1.

En la determinación de la conformación racional y organización en flujo del proceso tecnológico cosecha-transporte de la caña de azúcar, es importante señalar el impacto económico que se produce al determinar la cantidad racional de conjuntos de transporte para una cosechadoras, obteniéndose que por pérdidas totales por paradas (cosechadora + medio de transporte) resulta racional la asignación de cinco medios de transporte con un costo de 131,00 peso/h, lo cual en comparación con la actual composición de cuatro conjuntos de transporte con un costo de 167,02 peso/h, posibilita obtener un ahorro económico de 36,02 peso /h.

Por otro lado si se considera la probabilidad de cola del complejo cosecha-transporte, entonces resultaría más racional la asignación de seis medios de transporte, propiciando una reducción en las pérdidas por paradas de 62,71 peso/h.

**TABLA 1. Resultados del cálculo para la determinación de la variante racional de organización de la brigada de cosecha-transporte**

Indicadores	Cantidad de medios de transporte				
	2	3	4	5	6
Cantidad de solicitudes en espera de ser satisfechas ( $m_s$ ).	-	-	4,47	2,49	1,98

Indicadores	Cantidad de medios de transporte				
	2	3	4	5	6
Tiempo medio de espera del complejo cosecha-transporte ( $t_{esp}$ ), hora.	-	-	1,34	0,74	0,59
Pérdidas por paradas de la cosechadora, peso/h.	-	-	111,46	61,65	49,07
Pérdidas por paradas de los medios de transporte, peso/h.	-	-	55,56	69,45	83,34
Pérdidas sumadas de las paradas, peso/h.	-	-	167,02	131,00	132,41
Pérdidas sumadas de las paradas, considerando la probabilidad de cola del complejo, peso/h.	-	-	162,01	110,04	99,30
Ganancia máxima a obtener con el empleo de la Programación Lineal, peso	-	-	-	-	373,77

En los resultados representados en la Tabla 1 se puede observar que para la variante de dos y tres medios de transporte se cumple la condición de  $\varphi > n$ , por lo que el sistema no puede satisfacer las solicitudes y la cola va a crecer indefinidamente.

Otro resultado que se muestra es la ganancia económica máxima a alcanzar con la determinación de la cantidad racional de medios de transporte, para la cual se empleó el sistema informático QMWIN, específicamente la Programación Lineal

Con el empleo de este método matemático se evidenció que la variante de seis medios de transporte es la de mayor racionalidad pues se obtiene una ganancia máxima de 373,77 peso en un volumen de producción de 532 t aunque potencialmente se podría realizar un volumen de producción 533,78 t. Por tanto al considerarse lo anterior podría cosecharse 1,78 t adicionales de caña.

## CONCLUSIONES

- Los fundamentos teórico-metodológicos planteados confirmaron su validez para la determinación de la conformación racional de los medios de cosecha-transporte de la caña de azúcar.
- Las investigaciones experimentales realizadas en rendimientos agrícolas entre 70...90 t/ha permiten estimar el comportamiento del parámetro de la productividad y tiempo de llenado del medio de transporte KAMAZ con remolque.
- Con el empleo de la Teoría de Cola, se determinó que la cantidad racional de conjuntos de transporte para las condiciones investigadas, es de seis medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 99,32 peso/h lo cual posibilita obtener una reducción en las pérdidas por paradas de 62,69 peso/h respecto a la conformación actual de la brigada.
- Con el empleo de la Programación Lineal la conformación de seis medios de transporte fue validada, pues con esta variante es posible obtener una ganancia económica máxima de 373,77 peso para el volumen de producción realizado.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- AMU, L. G.: "Logística de cosecha. Evaluación de tiempos y movimientos. Indicadores y control", *Revista Técnicaña*, ISSN: 0123-0409. 26: 25-30, 2010.
- SHKILIOVA, L.; C. IGLESIAS C. y A. MIRANDA C.: "Metodología para el cálculo de la productividad de las cosechadoras de arroz en función de la utilización del tiempo de turno", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 16(1): 58-60, 2007.
- IGLESIAS, C. C.E., Y. MOREJÓN y R. LLANES.: "Determinación de la composición del complejo cosecha-transporte del arroz con la aplicación de la Teoría del Servicio Masivo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 21(2): 24-29, 2012
- IZMAILOV A.Y.: *Technologies and technical solutions to increase the effectiveness efficiency of transport systems of agriculture*, 200pp., Ed. M.FGNU "Rosinformagroteh", ISBN: 978-5-7367-0683-9, Rusia, 2007.
- MATOS, R. N. y C. IGLESIAS: "Modelo económico-matemático para la organización racional de los medios técnicos en la cosecha-transporte-recepción de la caña de azúcar", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 21(3): 49-54, 2012a.
- MATOS, N.: "Optimización del proceso cosecha - transporte - recepción de la caña de azúcar" *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, ISSN: 1994-1536, 5(3): 2012b.
- MATOS, N. y Y. MARTÍNEZ: "La inteligencia artificial. Nuevo enfoque en la evaluación de las máquinas en el complejo cosecha - transporte - recepción de la caña de azúcar" *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 4(2): 60-64, 2014.
- MATOS, R. N.; C. IGLESIAS; E. GARCÍA: "Organización racional del complejo de máquinas en la cosecha-transporte - recepción de la caña de azúcar en la Empresa Azucarera "Argentina"", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(2): 28-33, 2014.
- NC 34-37: 2003: *Metodología para la evaluación tecnológico-explotativa*, 21pp., Oficina Nacional de Normalización: Máquinas Agrícolas y Forestales. La Habana, Vig. octubre 2003.
- RTM 44-62. *Metodología para la elaboración de los datos empíricos*. Comité de Normas, Estándares y Mediciones del Consejo de Ministros de la URSS. Moscú, Rusia, 1966.
- SERVER, P., DIEGUEZ, R., FERNÁNDEZ, R.: "El transporte de la caña de azúcar utilizando la modelación", *Revista Universitaria*, ISSN: 1607-6079, 3(1): 2002.
- SHEPELYOV, S.D; OKUNE, G.A.; CHERKASOV, YB.: *Influencia del período de servicio a la cosechadora en la estructura tecnológica de línea espera*. *Revista Agro ingeniería. Chelyabinsk*, ISSN:77-155498 [en línea] 2014, Disponible en: [www.libr.orensau.ru](http://www.libr.orensau.ru). [Consulta: 25 febrero 2015].

YESIN, K.S.: "Methods of selection of transport during grain harvesting, cultural Tour", *World of Transport and Technological Machines*, ISSN: 77-47352. 41(2): 95-102, 2013.

FERNÁNDEZ, A. y ÁLVAREZ, E.: "Determinación de los principales indicadores de fiabilidad de la cosechadora de caña KTP-1", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 1(3): 57-60. 1988.

FERNÁNDEZ, A. y DELGADO, N.: "Análisis del trabajo del parque de tractores en función del número de roturas imprevista" *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 2(1): 27-32, 1989.

SUÁREZ, P.; RODRÍGUEZ, Y.; MÁRQUEZ, K: "Determinación y análisis de los principales índices de explotación de las cosechadoras de caña CAMECO". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 15(4): 23-27, 2006.

**Recibido:** 15 de marzo de 2015.

**Aprobado:** 13 de noviembre de 2015.

**Publicado:** 30 de diciembre de 2015.

*Yanara Rodríguez Lopez*, Ing. Prof. Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP: 32700. Correo electrónico: [yanita@unah.edu.cu](mailto:yanita@unah.edu.cu)

*Yanoy Morejón Mesa*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas Correo electrónico: [yym@unah.edu.cu](mailto:yym@unah.edu.cu)

*Dagoberto M. Sosa Guerra*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas Correo electrónico: [dagoberto@unah.edu.cu](mailto:dagoberto@unah.edu.cu)

*Orlando Martínez Bao*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas Correo electrónico: [ombao@unah.edu.cu](mailto:ombao@unah.edu.cu)

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

**Logos representativos**  
de las diferentes secciones  
que usted encontrará en la  
**Revista Ciencias Técnicas  
Agropecuarias**

 Máquinas a Prueba	Mecanización Pecuaria 
 Explotación y Procesos Mecanizados	Tracción Animal 
 Agricultura de Precisión	Reparación y Tecnología Mecánica 
 Tractores y Máquinas Agrícolas	Electrificación y Construcciones Rurales 
 Utilización de la Energía en la Agricultura	Computación y Matemática Aplicada 
 Suelo y Agua	Docencia y Capacitación 
 Oleohidráulica	Agricultura Conservacionista 
 Postcosecha	

**Suscríbase**